Universidad de Málaga
Doctorado en Ingeniería Mecatrónica
Asignatura: Simulación Numérica de Flujo Alrededor de Vehículos.

Por:
Cosme Rafael Marcano Gamero.

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN 2D DE VEHÍCULO TERRESTRE, USANDO *GAMBIT* Y *FLUENT*.

Prof. Dr. Joaquín Ortega.

Puerto Ordaz. Julio, 2007

1. Introducción.

La modelación y simulación de situaciones prácticas a través de métodos numéricos ejecutados en la computadora son, sin duda alguna, herramientas muy útiles para obtener la solución de una gran variedad de problemas. En particular, este tipo de herramientas aplicadas a campos de la ciencia como la aerodinámica, la hidráulica y la mecánica de los fluidos, han permitido un muy significativo avance en el diseño de vehículos más seguros, veloces y confiables.

Precisamente de una aplicación de modelación y simulación de un vehículo terrestre, en dos dimensiones, es que trata el presente informe, en donde se pretende aplicar paquetes numéricos comerciales al estudio de un vehículo para observar su comportamiento dentro un fluido a su alrededor. Variables como presión y velocidad serán visualizadas para analizar su afectación por parte del vehículo en movimiento.

El número de Reynolds del fluido así como la altura del diámetro hidráulico son algunos de los múltiples factores considerados, sin restar importancia a aquellos que tienen más que ver con la parametrización y afinación del modelo geométrico y los métodos de aproximación numérica utilizada para la obtención de resultados.

2. Generalidades.

El presente trabajo versa sobre la simulación de la dinámica de un vehículo terrestre en movimiento dentro de un fluido: aire. Este vehículo está sometido a la acción de varios factores, como las fuerzas inerciales y viscosas relacionadas con su propio peso y las características de viscosidad y densidad del aire. La velocidad de movimiento y la rugosidad de la carretera por donde se desplaza, entre otros factores, también serán tomadas en cuenta para efectos de hacer la simulación tan real como sea posible, dentro de nuestras posibilidades.

2.1. Algunos comentarios sobre flujo y el número de Reynolds, *Re*.

En Mecánica de los Fluidos, el número de Reynolds [1] es el cociente de las *fuerza inerciales* ($v_s\rho$) y *fuerzas viscosas* (μ/L); en consecuencia, este número cuantifica la importancia relativa de estos dos tipos de fuerzas para condiciones de flujo dadas. Por esto, es utilizado para identificar diferentes regímenes de flujo, tales como: *laminar* y *turbulento*, [1], [6].

Debe su nombre a Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo propuso en 1883, y se define como:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v_s^2 / L}{\mu v_s / L^2} = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} = \frac{fuerzas\_inerciales}{fuerzas\_viscosas}$$

donde:

- v_s – Velocidad media del fluido, [m s^{-1}]
- L - Longitud característica o el Diámetro Hidráulico, [m]
- μ - Viscosidad dinámica (absoluta) del fluido, [N s m^{-2}] o [Pa s]
- ν – Viscosidad cinemática del fluido: $\nu = \mu / \rho$, [m^2 s^{-1}]
- ρ – Densidad del fluido, [kg m^{-3}].

Para flujos en tuberías, por ejemplo, la *Longitud* Característica es el diámetro de la tubería, si su sección transversal es circular, o su *diámetro hidráulico* si no lo es.

Por su definición, Re es adimensional. A manera de ejemplo, calculemos el Número de Reynolds, Re, para el aire, en las condiciones del caso a resolver:

$$\rho = 1.225 Kg/m^3 \; @ \; T_{ambiente} \approx 20^\circ C$$
$$\nu = 1.7894 x 10^{-5} Kg/m-s$$
$$V = 42 m/s$$
$$L = 7 m$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho VL}{\nu} = \frac{1.225 * 42 * 7}{1.78x10^{-5}} \approx 201268x10^{5}$$

El *flujo laminar* se presenta para valores pequeños del número de Reynolds, en donde las fuerzas viscosas son dominantes y está caracterizado por un movimiento del fluido suave y constante, mientras que el *flujo turbulento*, por otra parte, se presenta a valores altos de *Re*, (como en el caso que nos ocupa, ver cálculo más arriba) siendo dominantes las fuerzas inerciales, y se caracteriza por producir torbellinos aleatorios, vórtices y otras fluctuaciones de flujo.

2.2. Coeficientes *K* y ε

En el problema que vamos simular, el vehículo se desplaza a una relativamente alta velocidad. De 150 Km/h, i.e., unos 42 m/s, aproximadamente, por lo que se crean condiciones de flujo turbulento. Existen varias técnicas para describir y estudiar la dinámica de este tipo de flujo, los cuales dependen del tipo de flujo bajo estudio. En el caso del aire, destaca el Método $K\varepsilon$, el cual hace uso de la *energía cinética*, *K,* de la turbulencia del aire, así como de la *tasa de disipación,* ε, de dicha turbulencia.

Por otra parte, el estudio del carro, como cuerpo sólido dentro de condiciones de flujo turbulento, se puede estudiar usando el *Diámetro Hidráulico*, i.e., la altura del orificio de entrada del entorno (especie de túnel de viento, aunque en 2D) dentro del cual se desplaza, así como de la *Intensidad de la turbulencia, I*. En nuestro caso, usaremos un valor de *I=2.44%*, que corresponde a flujo turbulento.
:
En las condiciones de contorno del flujo de entrada usamos: $K = 1Kg * m^2 / s^2$ **y** $\varepsilon = 1.44$. La presión cero a la salida indica que no ha habido variación de la presión a la cual se encuentra sometido el vehículo, la cual es de 1 atm., i.e., la presión atmosférica.

La intensidad de la turbulencia es expresada en términos de la raíz cúbica de la Tasa de Disipación de la Turbulencia (*EDR: Eddy Turbulence Rate*) que aquí hemos denominado ε . El valor de EDR está entre 0.3 y 0.5, que son corresponden con turbulencia moderada. Vientos con turbulencias mayores a 0.5 son considerados con turbulencia severa [6]. En nuestro caso, trabajamos con una turbulencia de 2.44%, cuya raíz cúbica es 1.34, lo cual corresponde con una turbulencia severa.

2. **Planteamiento del Problema.**

El problema consiste en la simulación numérica de un vehículo, marca *Toyota*, modelo *Corolla GLx 1.8*, Año: 1997.

Figura 1. Toyota *Corolla, GLx 1.8*, 1997

2.1. Dimensiones Externas

Para iniciar la caracterización del problema de manera adecuada para la simulación en *Fluent versión 6.1.18,* de *Fluent, Inc.*, debemos primeramente, realizar un mallado del vehículo, haciendo uso de una herramienta apropiada como *Gambit*, del mismo desarrollador de software para aplicaciones numéricas.

Característica	Valor (mm)
Longitud total	4.369
Ancho Total	1.684
Altura Total	1.359
Distancia entre ejes	2.464
Ancho delantero	1.461
Ancho Trasero	1.450
Círculo de giro de las ruedas	9.815

Tabla 1. Dimensiones externas del vehículo.

Seguidamente, se procede a escoger una serie de puntos característicos sobre el contorno del vehículo. Se deben escoger puntos que permitan delinear formas conocidas, como líneas, arcos de circunferencia, sucesión de segmentos de recta, etc.

A continuación, la Figura 2 muestra la selección de puntos que se realizara sobre el vehículo bajo estudio.

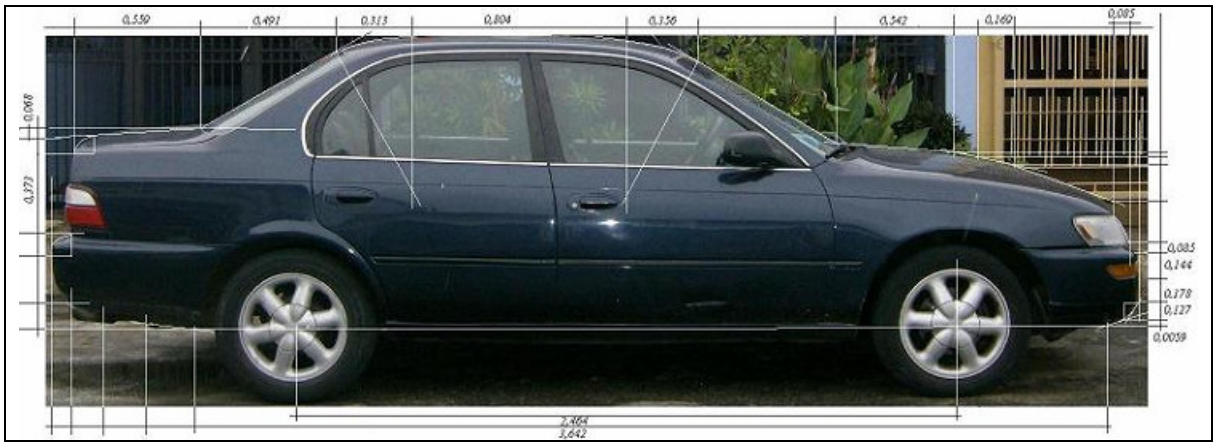
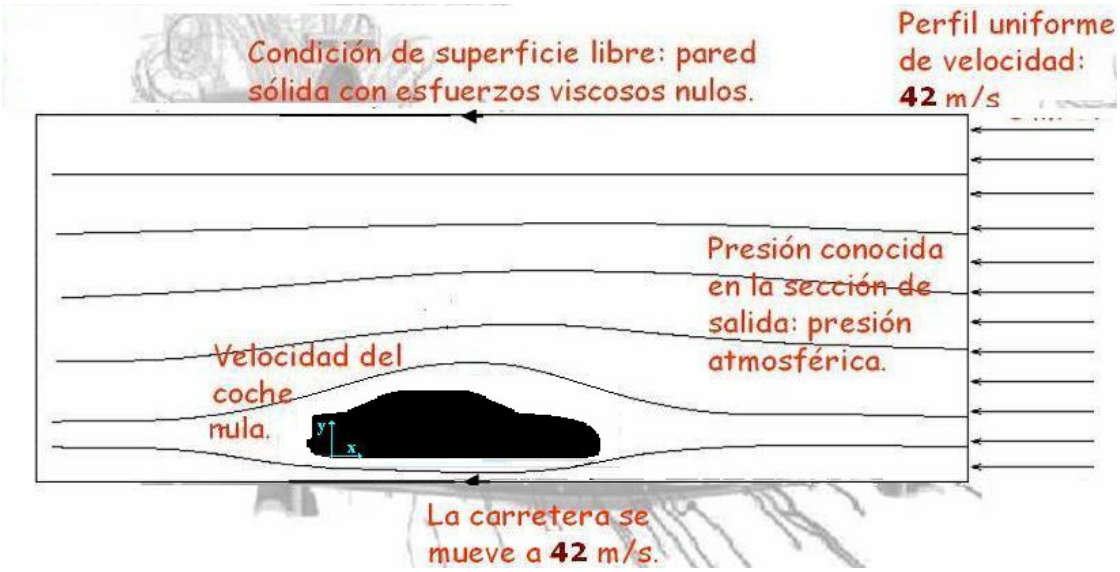


Figura 2. Dimensiones del vehículo (No a escala). (*MyCar.jpg*).

Todas las distancias están expresadas en metros (*m*). Es de destacar que no todos los puntos medidos aparecen representados en la Figura 2.

En síntesis, el problema que nos ocupa puede ser descrito mediante las especificaciones que aparecen en la figura siguiente.


Condición de superficie libre: pared sólida con esfuerzos viscosos nulos.
Perfil uniforme de velocidad: 42 m/s
Presión conocida en la sección de salida: presión atmosférica.
Velocidad del coche nula.
y
x
La carretera se mueve a 42 m/s.

Con esta información, iniciamos una sesión de trabajo en Gambit y procedemos a introducir los puntos antes seleccionados, a fin de delimitar el contorno del vehículo. No obstante, es necesario tomar en cruenta algunas consideraciones generales.
–

3. Mallado con *Gambit*.

La versión de *Gambit* que utilizaremos es la 2.2.30, [3], aunque cualquiera de las versiones de *Gambit* para generar mallas en dos dimensiones puede ser utilizada.

Gambit requiere de las dimensiones externas para generar el contorno del vehículo a ser mallado; estas dimensiones se pueden extraer del *Manual de Usuario* o de algún sitio en *Internet* especializado en vehículos de este tipo.

3.1. Consideraciones Generales.

En primer lugar, hay que establecer la ubicación más conveniente del sistema de referencia respecto del cual fijar los puntos.

Es conveniente fijar el sistema de referencia en el vehículo, de tal manera que podamos considerarlo estacionario respecto del entorno y hacer que sea éste el que se mueva respecto del vehículo; de esta manera le damos movimiento al fluido (aire) respecto del vehículo y podremos estudiar la velocidad, presión y turbulencia del mismo, entre otras variables.

En segundo lugar, debemos definir las dimensiones del entrono dentro del cual dibujaremos el vehículo. Por regla general, aunque no es universal, se deja un espacio libre delante del vehículo igual a, al menos una vez, la longitud de éste. Asimismo, de dejan al menos dos veces la longitud del vehículo hacia atrás de éste, de manera de poder estudiar las perturbaciones en la velocidad, presión o turbulencia, que pueda ocasionar éste a su paso dentro del fluido.

En tercer lugar, establecemos al menos tres veces la altura del vehículo como altura del entorno, i.e., el diámetro hidráulico del "túnel de viento" por donde se desplaza el vehículo.

Por último, dado que el perfil que oponen los cauchos al viento es proporcionalmente reducido, en relación a las demás dimensiones del vehículo, éstos no serán incluidos en la delimitación del contorno, sin que esto origine pérdidas considerables de precisión de nuestro estudio.

3.2. Introducción de la data.

Especificadas estas dimensiones del entorno, se procede a introducir la data del contorno del vehículo en el ambiente de trabajo de *Gambit*.

Una vez introducidos los puntos, se procede a trazar líneas rectas entre aquellos puntos que definan segmentos rectos del coche. Asimismo, se determinará la ubicación de segmentos del contorno que puedan ser aproximados por arcos de circunferencia, sucesiones de segmentos de rectas y curvas de ajuste.

3.3. Generación de la malla.

Es bueno destacar que después de definido el contorno y extraída la forma fluida del vehículo, debemos especificar el *solucionador numérico* (*solver)* que vayamos a utilizar para obtener la solución del problema. Esto se hace a través de la opción *Solver* del menú principal, el cual desplegará un número de opciones que incluyen a *ANSYS* y a *Fluent*; en nuestro caso, escogeremos *Fluent* [4], [5].

Gambit generará varios archivos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento (*.jou, *.dbs, *.trn*), en el mismo directorio de trabajo, además de tres archivos principales, de acuerdo al nombre que hayamos escogido para nuestro modelo (*QCorolla.dat, QCorolla.msh*) * la letra *Q* en el nombre sólo indica que este modelo fue realzado con elementos cuadriláteros), es decir, tipo *quad*. En este caso, *Gambit* genera *QCorolla.dat*, que contiene los datos brutos de los puntos escogidos sobre el contorno del carro, tal y como los introdujimos; *corolla.dbs*, que constituye la Base de Datos preparada por *Gambit* para la generación de la malla; y, *corolla.msh*, que contiene la data de los puntos que conforman la malla.

Gambit ofrece varios métodos para generar la malla, como la definición de capas límite y la definición de funciones de tamaño (*s-function*). En este caso, definiremos una función de tamaño, para generar una malla con elementos cuadrilaterales, i.e., tipo *quad*; con un tamaño inicial de los elementos de 0.05, un factor de crecimiento (*growth factor*) de 1.1 y un tamaño máximo de 0.5. Esto es, el tamaño de los elementos de la malla partirá de 0.05 y crecerán a razón de 10% para cada nueva capa, hasta alcanzar un tamaño máximo de 0.5; una vez alcanzado este valor, todos los demás elementos se generarán de ese tamaño. La Figura 3 muestra la malla generada por *Gambit* para este caso.

El tamaño inicial de los elementos y el factor de crecimiento son determinantes de la buena calidad de la malla, por lo que pudieran tener que ser cambiados posteriormente para generar una mala más adecuada, dependiendo de los resultados del cheque de la calidad de la misma. Sin embargo, es bueno mencionar que los *Solvers* mismos, como el caso de *Fluent*, ofrecen la posibilidad de mejorar la malla generada por *Gambit,* a través de métodos de suavizado yen intercambio *(smoothing/swapping*), como veremos más adelante, cuando estemos trabajando con este paquete.

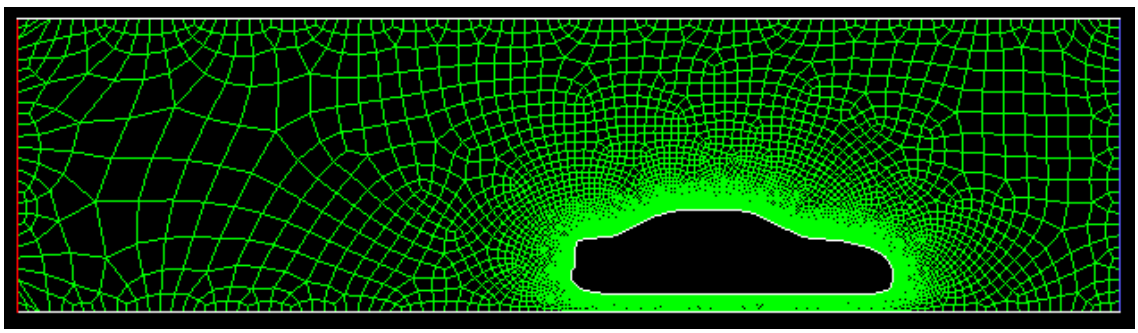
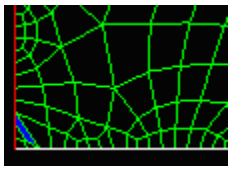


Figura 3. Apariencia del mallado producido por *Gambit* sobre el modelo bajo estudio.

3.3.1. Estadísticas de la malla.

A fin de verificar la calidad de la malla, podemos seleccionar la operación de chequeo de la malla que ofrece *Gambit*. A continuación, se muestran los resultados de tal.

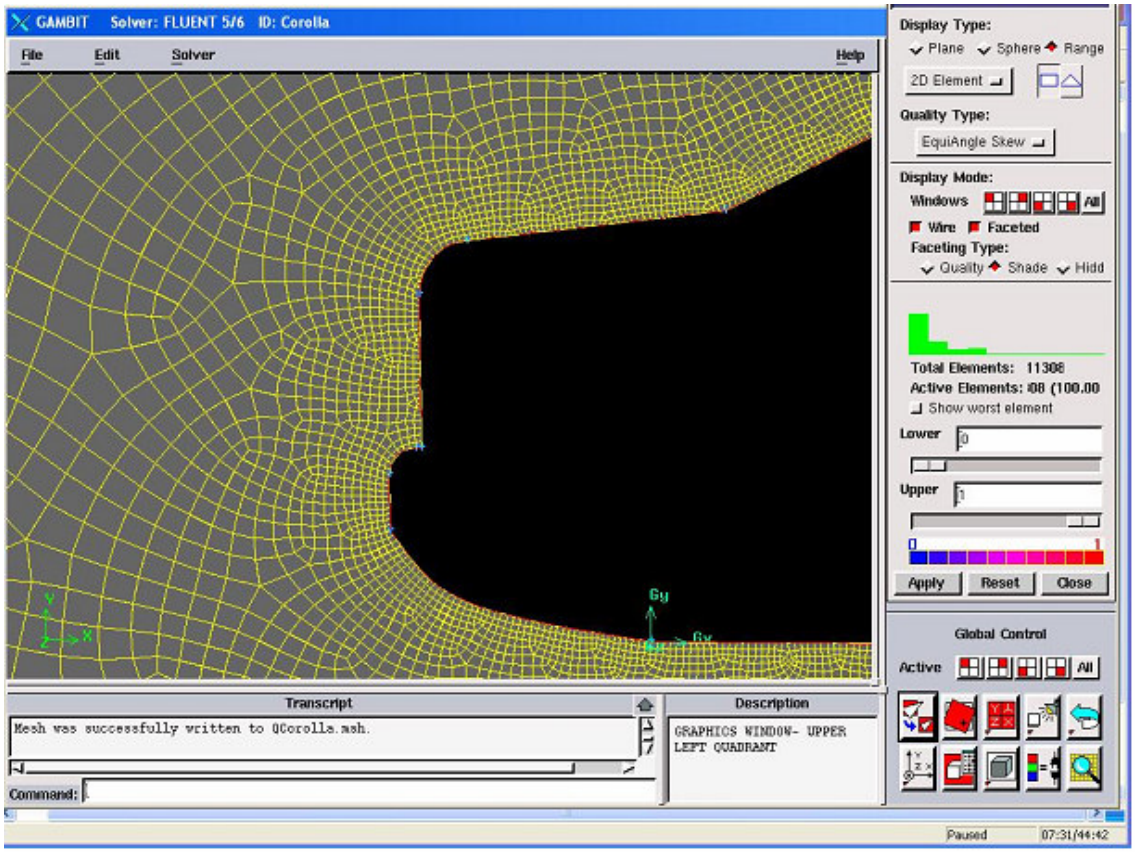
De los resultados de la operación de chequeo se desprende que la calidad de la malla, aunque no es excelente, es bastante aceptable. El cheque arrojó que el elemento más pobre tiene un índice de 0.78 y está ubicado en la esquina inferior izquierda del mallado como se muestra a continuación, destacado en azul.



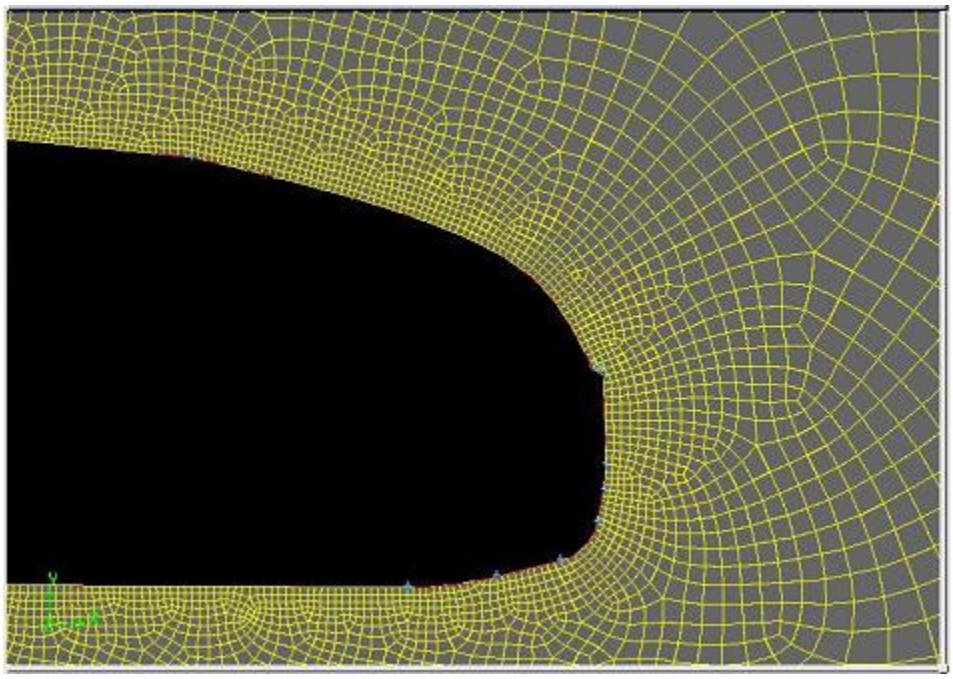
Elemento de peor calidad

Por otro lado, el histograma que aparece en color verde a la derecha de la siguiente gráfica, nos indica que casi la totalidad de los elementos están concentrados en los dos primeros intervalos del índice de calidad, es decir, entre 0 y 0.2, lo cual expresa la bondad de la calidad de este mallado.

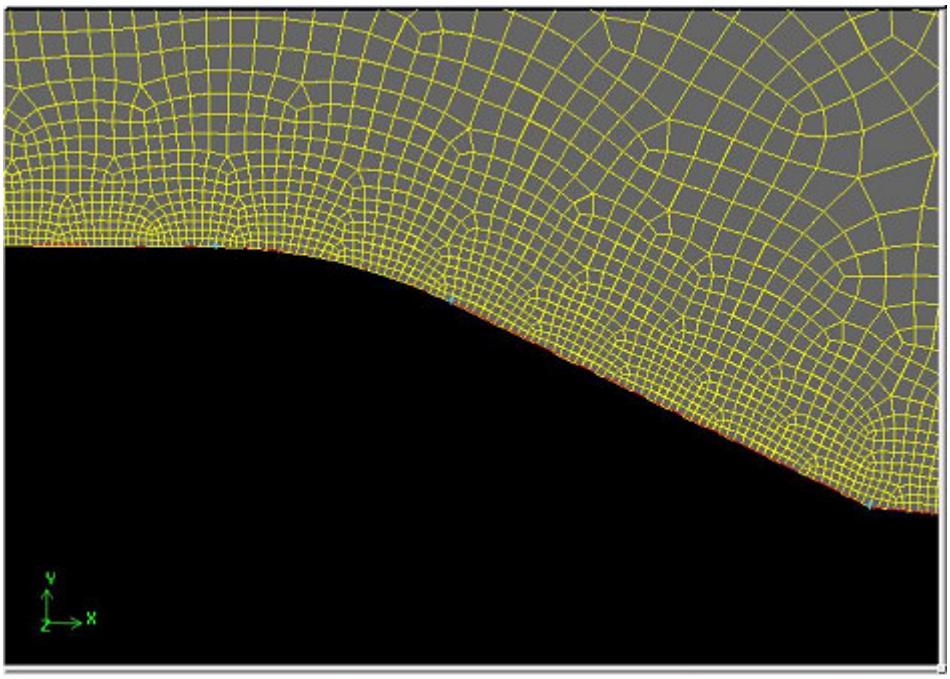
A continuación, revisaremos algunos lugares característicos en donde se pudieran presentar problemas de mallado; por ejemplo, en las esquinas o quiebres de líneas sobre el contorno del vehículo.



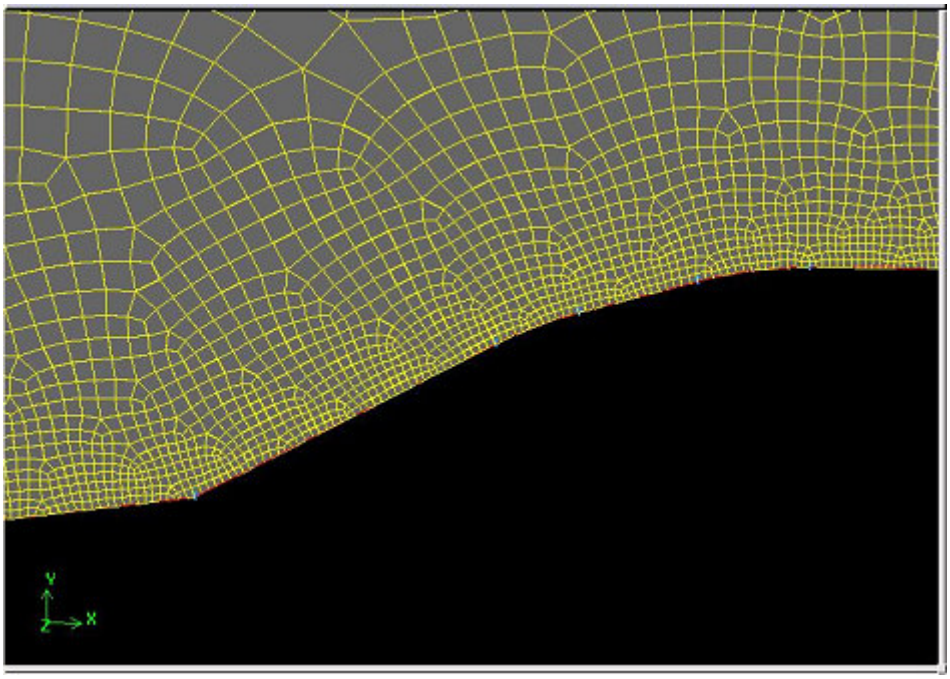
Vista de la cola del vehículo.



Vista de la trompa del vehículo.



Vista lateral del área del parabrisas delantero.



Vista lateral del área del parabrisas trasero.

4. Solución Numérica del Problema en *Fluent 6.1.18*.

Como mencionamos anteriormente, la solución requerirá de la generación en *Gambit* de una malla con elementos de cuatro lados, i.e., del tipo *quad* (*quadrilater:* cuadrilátero). Una vez sintetizado el modelo geométrico y la respectiva malla, se exportará a *Fluent 6.1.18*, para obtener la solución numérica.

Paso 1. Leer *qcorolla.msh*

Como ya se mencionó, *Gambit* genera un fichero denominado *corolla.msh***,** en este caso, que contiene toda la data de la malla que será utilizada por *Fluent* para obtener la solución numérica del problema. Este fichero debe ser leído por Fluent a través de la siguiente opción:

File -> Read -> Case

Esto abre un cuadro de diálogo, en donde especificaremos: *QCorolla.msh*.

```
> Reading "D:\QCorolla.msh"...
   11903 nodes.
     874 mixed wall faces, zone  3.
     100 mixed wall faces, zone  4.
     162 mixed wall faces, zone  5.
      27 mixed pressure-outlet faces, zone  6.
      27 mixed velocity-inlet faces, zone  7.
   22021 mixed interior faces, zone  9.
   11308 quadrilateral cells, zone  2.

Building...
     grid,
     materials,
     interface,
     domains,
     zones,
      default-interior
      flujoentrada
      flujosalida
      carretera
      techo
      wall
      flujo_de_aire
     shell conduction zones,
Done.
```

Como se puede observar, además de leer los contenidos del fichero, *Fluent* construye la malla, los materiales los dominios y las zonas, entre otras características, a partir de la malla producida por *Gambit*.

Paso 2. Chequear la integridad de la malla.

Grid -> Check

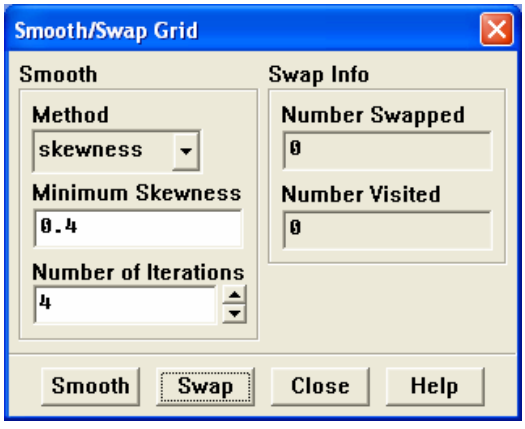
En la consola de *Fluent* aparecerá toda la información pertinente de la malla, como número de nodos, caras de células triangulares, zonas definidas, etc. A continuación, se muestra parte de los resultados del chequeo de la malla.

```
Grid Check
 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = -8.000000e+00, max (m) = 7.000000e+00
   y-coordinate: min (m) = -2.540000e-01, max (m) = 3.746000e+00
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 3.321749e-05
   maximum volume (m3): 3.417367e-01
     total volume (m3): 5.615832e+01
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 3.538132e-03
   maximum face area (m2): 7.794170e-01
 Checking number of nodes per cell.
 Checking number of faces per cell.
 Checking thread pointers.
 Checking number of cells per face.
 Checking face cells.
 Checking bridge faces.
 Checking right-handed cells.
 Checking face handedness.
 Checking element type consistency.
 Checking boundary types:
 Checking face pairs.
 Checking periodic boundaries.
 Checking node count.
 Checking nosolve cell count.
 Checking nosolve face count.
 Checking face children.
 Checking cell children.
 Checking storage.
```

Paso 3. Suavizar / intercambiar caras.

A fin de verificar y, de ser necesario, mejorar la calidad de la malla, podemos seleccionar:

Grid ->- Smooth/Swap



Aquí podemos especificar unas pocas iteraciones para que *Fluen*t proceda a suavizar la malla, si así lo considera conveniente, lo cual dependerá de la calidad de malla producida por Gambit o cualquier otro mallador que se haya usado. Una vez terminadas esas iteraciones, Fluent arroja información sobre los nodos que ha movido y una

indicación de cuánto mejoró la malla después de cada iteración del proceso de suavizado. En este caso, no fue necesario que moviera ningún nodo por lo que desplegará:

```
No nodes moved, smoothing complete.
Done.
```

Una vez terminado el suavizado, debemos pulsar el botón *Swap*, si es que el paso anterior tuvo que hacer algún movimiento de nodos. Esto es para que *Fluent* intercambie caras y realice algunos otros cambios en los nodos y celdas de la malla, a fin de mejorar su calidad. Al finalizar esta parte del proceso, se despliega la siguiente información en la consola.

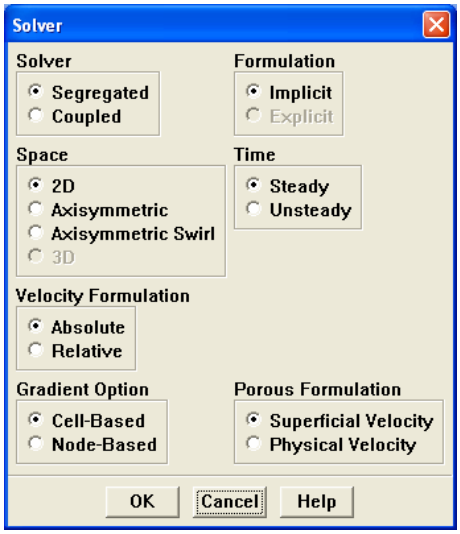
```
Number faces swapped:  0
Number faces visited:  22021
```

Lo cual ratifica que la malla es de buena calidad. En caso de ser necesario, es importante repetir estos dos paso (primero *Smooth* y luego *Swap*) hasta que el número de caras intercambiadas sea igual a cero, para garantizar la mejor calidad de la malla.

Paso 4: Define -> Models -> Solver

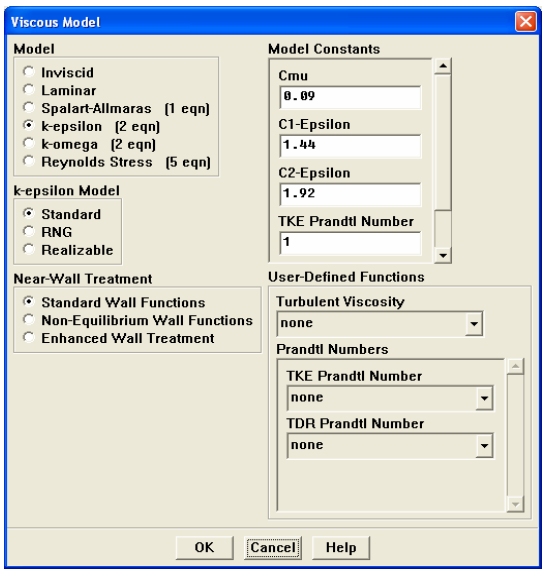
Para el caso que nos ocupa, se deben mantener los valores predeterminados, toda vez que el problema está planteado en el espacio bidimensional, es de naturaleza estacionaria, i.e., el comportamiento del sistema bajo estudio no cambia de acuerdo al momento en que se realice el experimento; además, la solución se realiza etapa tras etapa, una segregada de la otra, en otras palabras, las etapas del proceso de solución no están acopladas de ninguna manera.

Las opciones del *Solver* quedan establecidas como se muestra a continuación:



Paso 5. Definición de la viscosidad del modelo.

Define Models Viscous



Obsérvese que se seleccionó el modelo viscoso basado en la energía cinética de la turbulencia, $\boldsymbol{K}$, y en su tasa de disipación ε . El número de Prandt para la cuantificar la Energía Cinética de la Turbulencia, (*TKE: Turbulence Kinetic Energy*) quedó establecido en 1, como valor predeterminado.

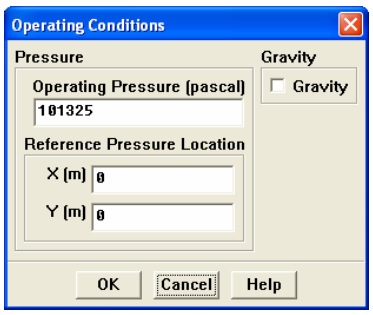
Paso 6. Definir opciones de Energía.

Define -> Models -> Energy

En este caso no aplica el uso del menú de energía (*Energy*) pues no trabajaremos con transferencia de calor.

Paso 7. Definición de condiciones de operación.

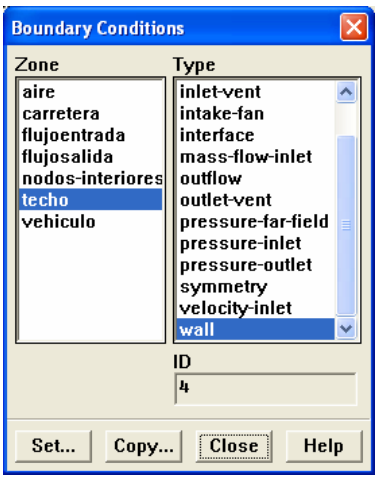
Define -> Operating Conditions



Que no sufrirán variación pues 101325 Pa = 1 atm, es decir, estamos operando a presión atmosférica

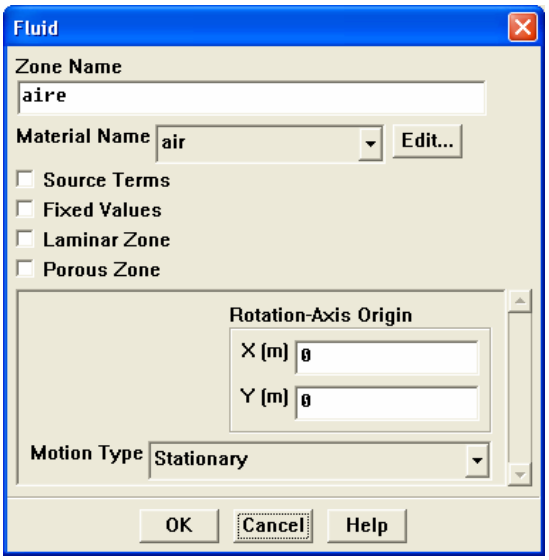
Paso 8. Definición de condiciones de Contorno.

Define -> Boundary Conditions



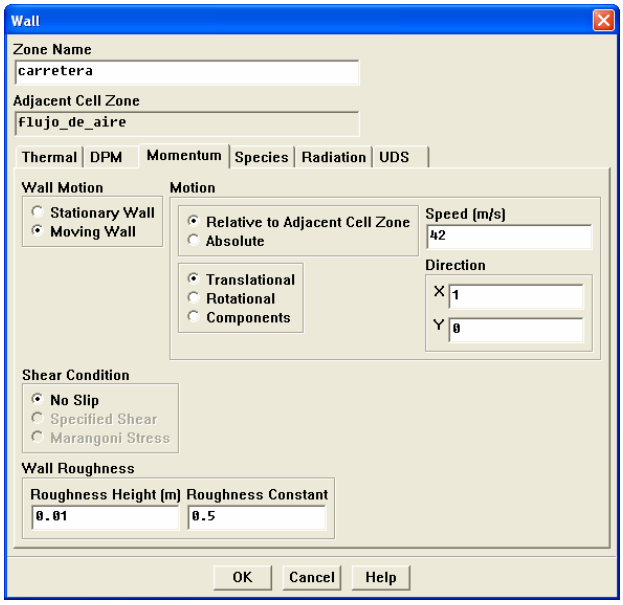
Este paso de definición de las condiciones de contorno se debe repetir para cada una de las zonas listadas en el menú de la izquierda. Una vez seleccionada una zona, por ejemplo, carretera, y su respetivo tipo, **wall**, se pulsa el botón ***Set*** y aparecerá el siguiente Cuadro de Diálogo:

a) Especificar *aire*



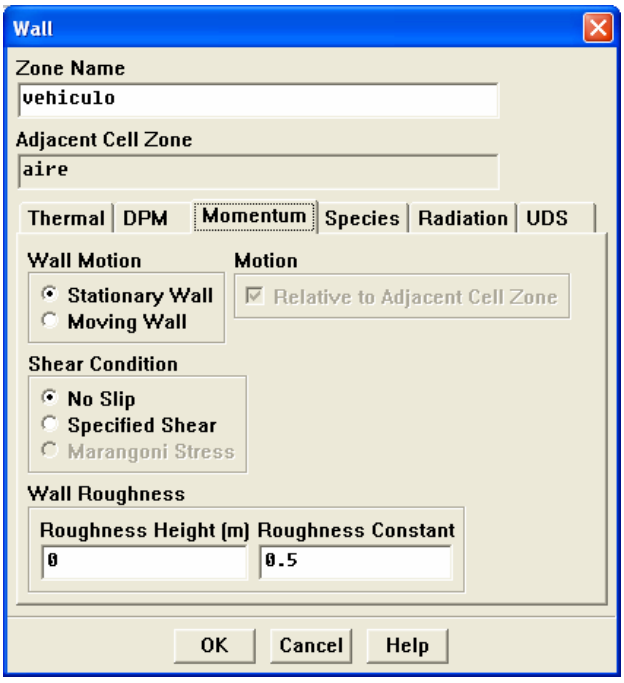
Estos parámetros quedan inalterados. (*air* está predefinido en la base de datos de Gambit).

b) Especificar *carretera*



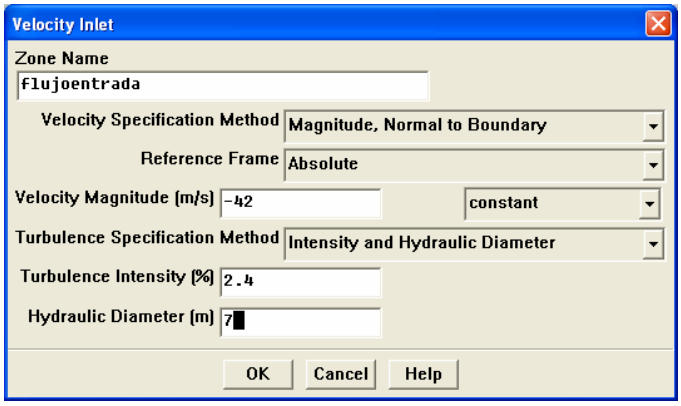
Como se ve, seleccionamos **Moving** Wall, para indicar que la carretera se mueve respecto del vehículo, a una velocidad de *42 m/s = 150 Km/h*; además, establecemos una *altura de rugosidad = 0.01 m.*
En las condiciones de contorno del techo, se considera que hay un rozamiento y que la fluido desliza sobre la superficie, por lo que se escoge *Specified shear*, aunque debemos especificar que las componentes de ese esfuerzo en x y en y son nulas

c) Especificar *vehículo*



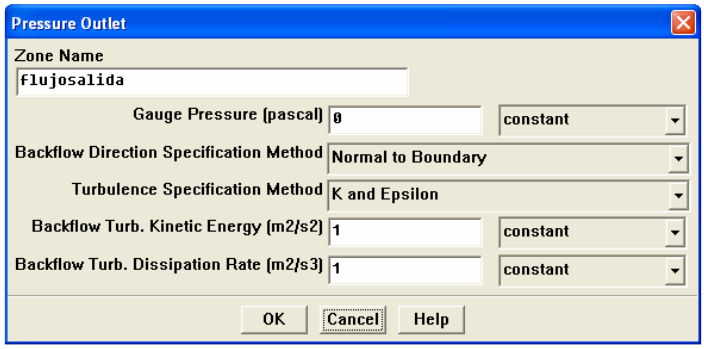
El vehículo no desliza respecto de la superficie de contacto y posee rugosidad cero, dado el acabado de la carrocería.

d) Especificar *flujoentrada*

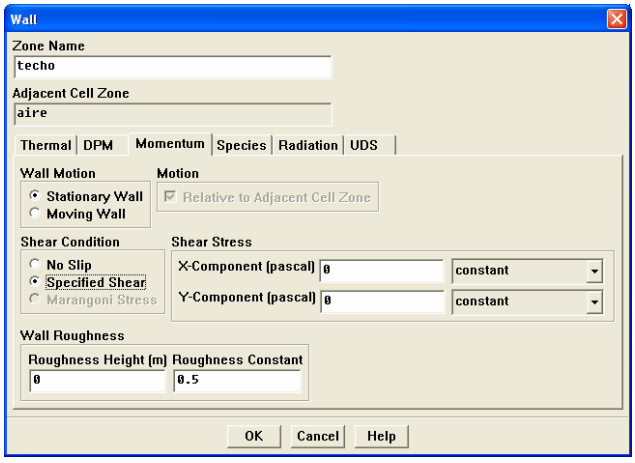


El flujo de aire de entrada se mueve a 42 m/s, hacia la izquierda, dentro de un "túnel" de 7 m de altura y con una intensidad de turbulencia de 2.4%

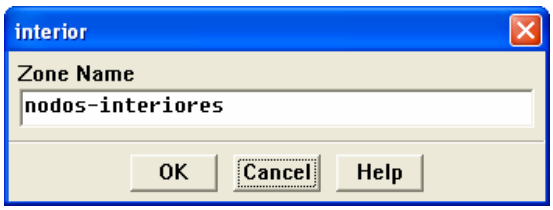
e) Especificar *flujosalida*



f) Especificar *techo*

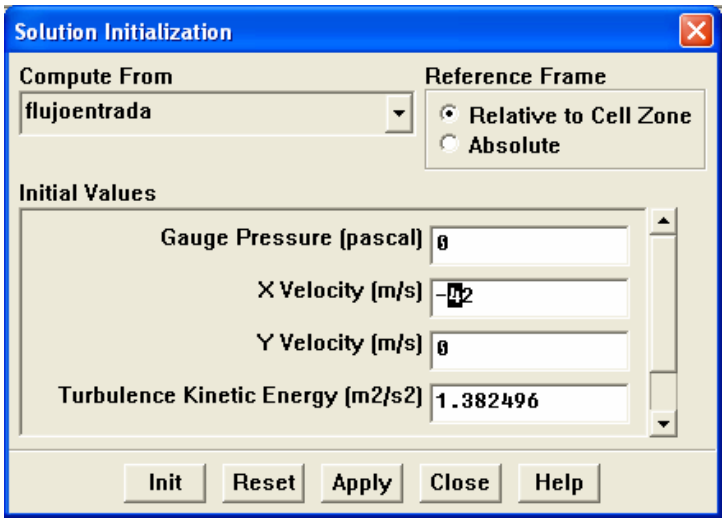


g) Especificar *default-interior*



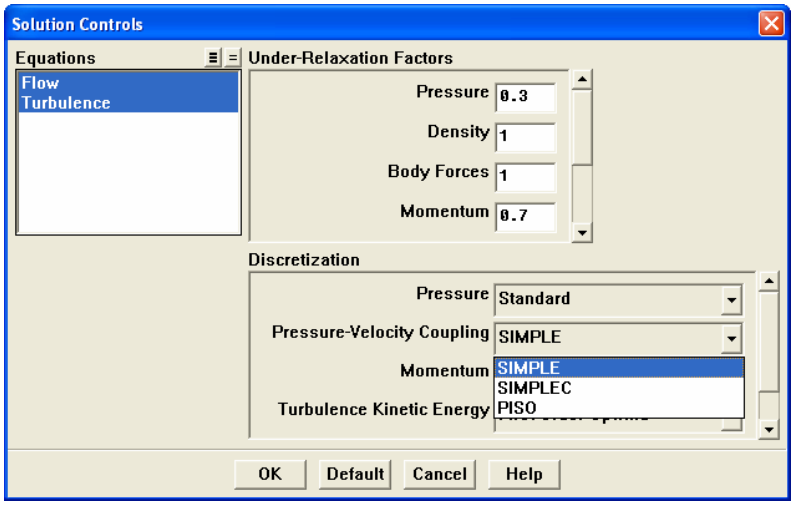
Se cambió el nombre de esta característica a nodos-interiores, que es lo único que se le puede cambiar.

Paso 9. Inicialización del modelo



Paso 10. Definición de parámetros de la solución.

Solve->Solution)



Los parámetros de sub-relajación quedan inalterados Los métodos quedan de primer orden, pues, aunque ofrecen más estabilidad que precisión, son adecuados para obtener una primera aproximación a la solución. Es de hacer notar que esta versión de *Fluent* no ofrece una opción *First Order* para *Pressure-Velocity coupling* (acoplamiento de presión y velocidad), por lo que se escogió el método SIMPLE [2].

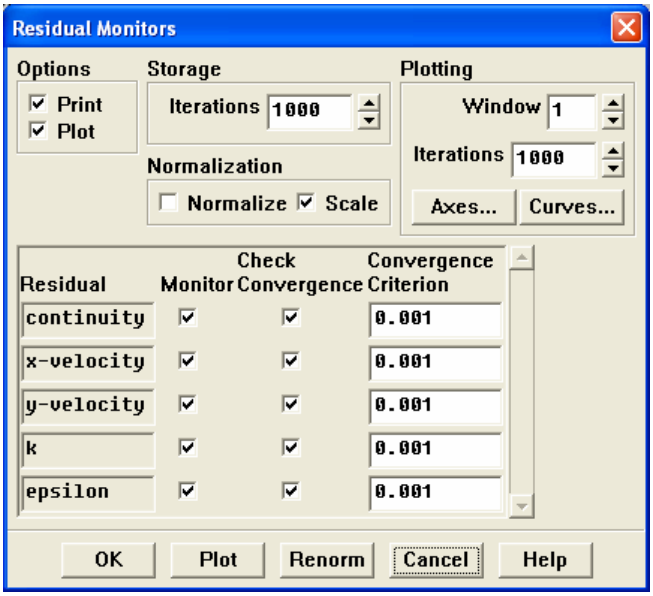
Los métodos de resolución numérica de este tipo de problemas utilizados por paquetes comerciales como *Fluent* y *CFD*, son, principalmente:

a. SIMPLE: *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, o método semi-implícito para ecuaciones de presión enlazada. Este método es ampliamente utilizado para resolver problemas de flujo estacionario.
b. PISO: *Pressure Implicit with Splitting of Operators*, o método de presión implícita con separación de operadores, el cual es muy adecuado para flujo no estacionarios. PISO es más lento que otros métodos, aunque requiere, en general, menos iteraciones para obtener resultados similares; además, es muy estable.

En nuestro caso, el flujo se puede considerar estacionario, por lo que podemos trabajar con el método SIMPLE.

Paso 11. Definición de las características de monitoreo.

Solve-> Monitors -> Residuals



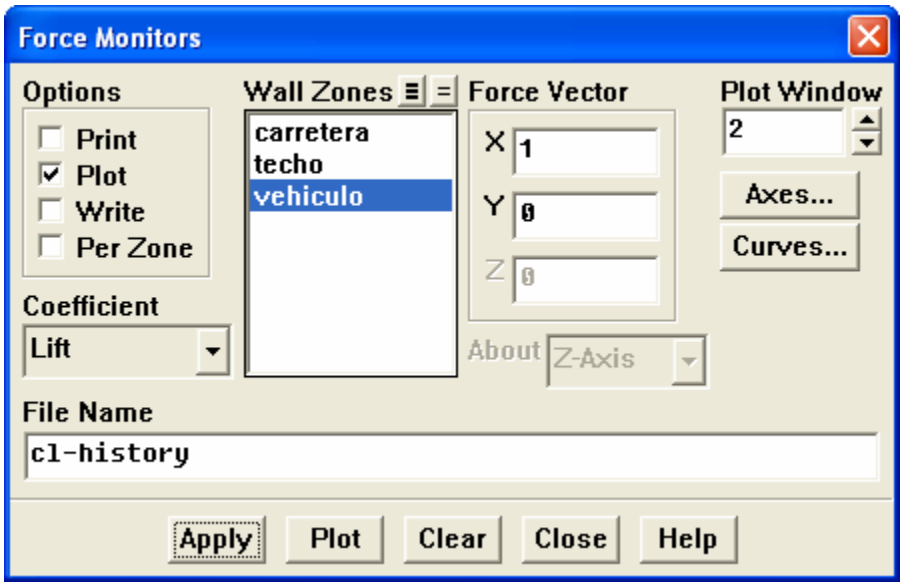
Aquí se pueden variar los criterios de convergencia de la solución que, por defecto, son iguales a 0.001.

También se puede especificar el número de la ventana en donde se graficará la variable monitoreada, partiendo de la ventana 0.

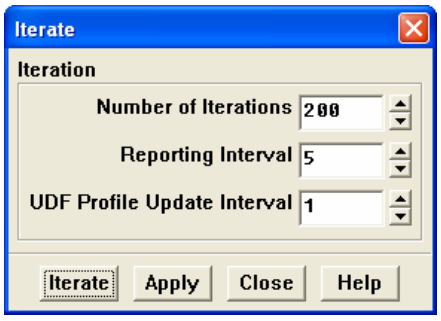
Nótese que se estableció la opción Moving wall, debido a que el sistema de ejes de referencia se hizo solidario al carro y no a la carretera. Se establece igualmente que la carretera se "desplaza" a una velocidad de 42 m/s respecto del carro (el signo negativo indica que la carretera se "desplaza" hacia la izquierda). y que tiene una rugosidad de 1 cm (= 0.01 m) de altura.

La constante de rugosidad se deja sin alteración.

Paso 12. Solve > Monitors > Forces



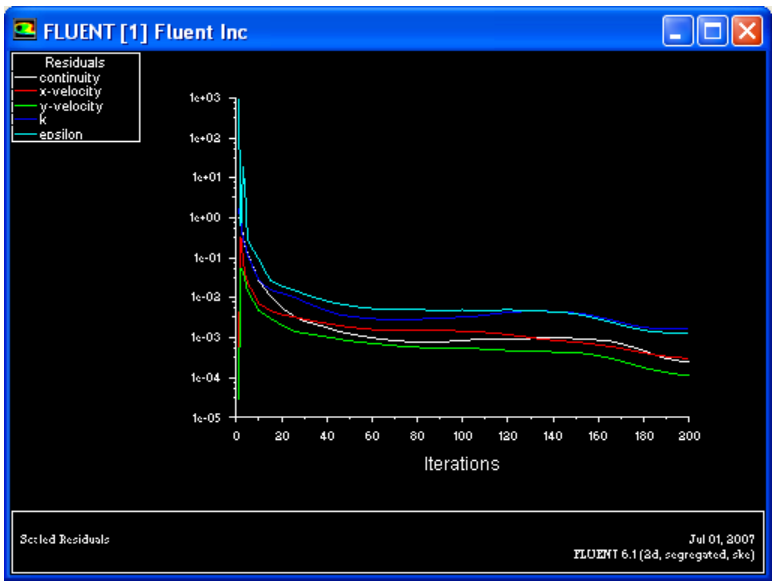
Paso 13. Iniciar las iteraciones.
Solve > Iterate



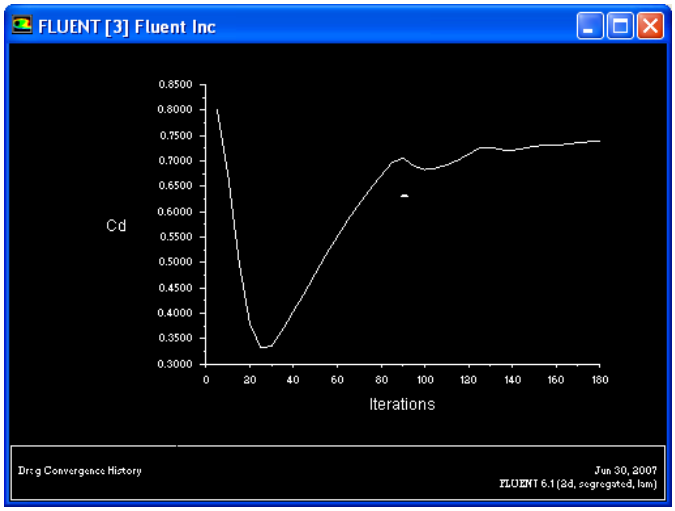
5. Análisis de la Primera Aproximación a la Solución.

A continuación se muestran las gráficas de los residuales de las componentes en *x* e *y* de la velocidad del fluido alrededor del vehículo. Nótese que 'estos tienden a cero, por lo que se garantiza la convergencia de la solución, como lo informa *Fluent* en su consola, con el siguiente mensaje.

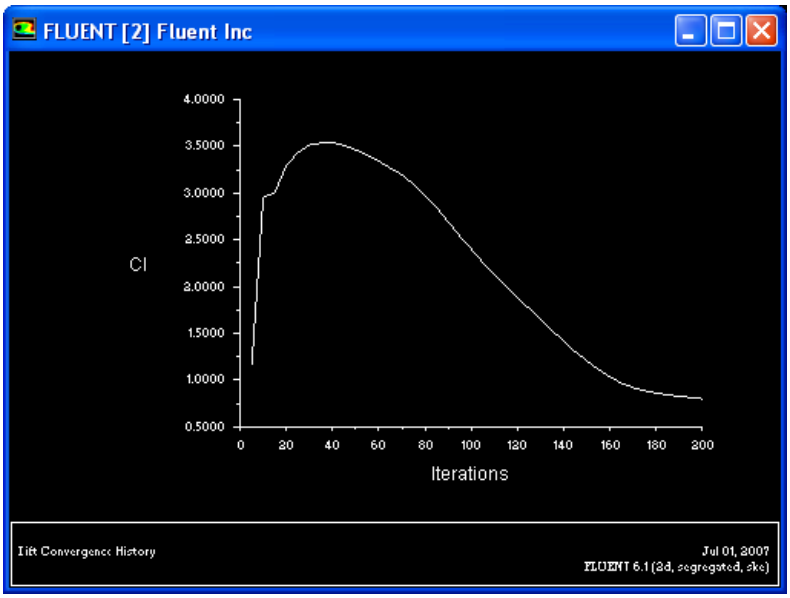
```
!  138 solution is converged
   138  7.6448e-04  9.9382e-04  4.7312e-04   0:00:27    62
```



En la gráfica anterior podemos apreciar que todos los errores correspondientes a las variables calculadas caen por debajo de 1e-03, i.e, los valores establecidos por omisión para los criterios de convergencia. Naturalmente, si se exigiera una mayor precisión, el número de iteraciones aumentaría..

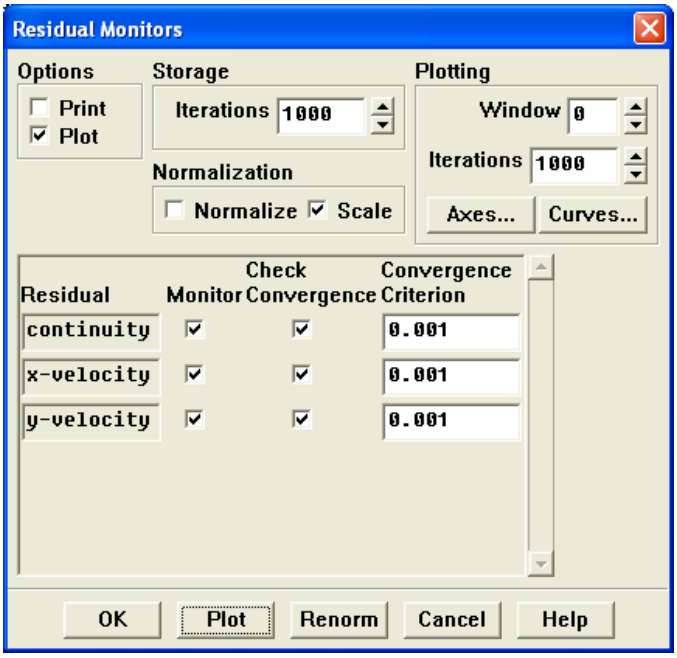


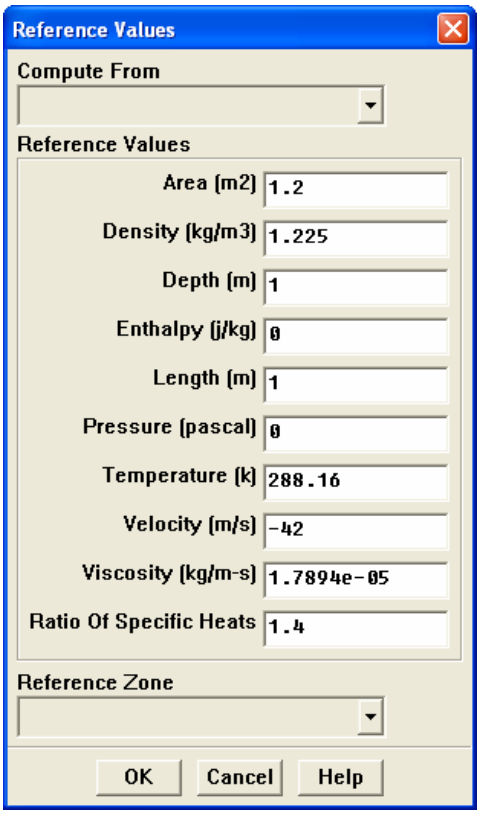
Comportamiento del Coeficiente de arratre, *Cd*



Comportamiento del Coeficiente de Sustentación, *Cl.*

Aunque *Fluent* muestra las gráficas durante la realización de las iteraciones, éstas se pueden reimprimir en cualquier momento pulsando la opción **Plot > Residuals**, en el menú principal



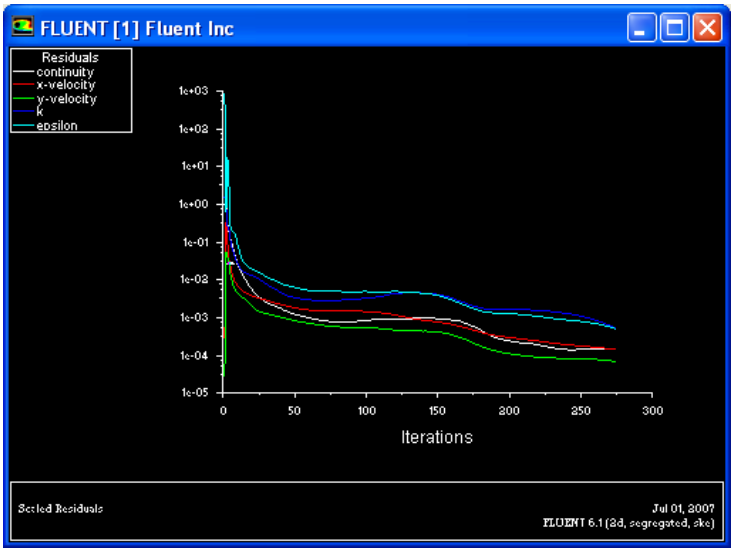


Definición de valores de referencia

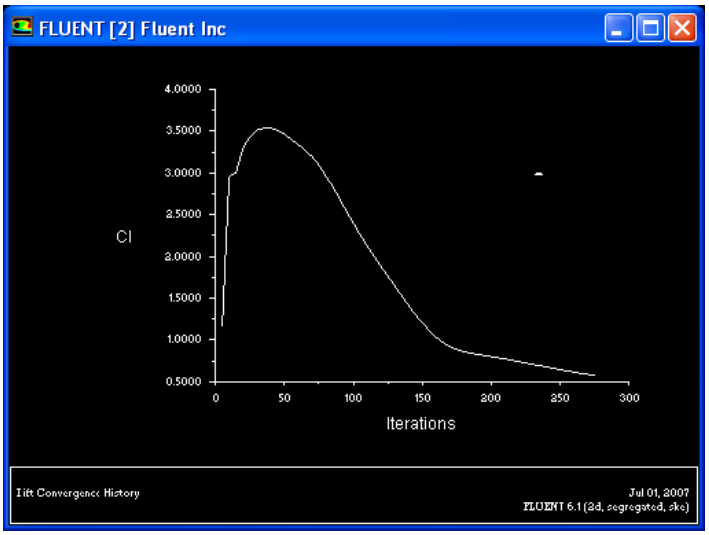
Después de 275 iteraciones, *Fluent* se detiene y reporta en su consola que el método ha convergido, usando métodos de primer orden, de la siguiente manera

```
!  275 solution is converged
   275 1.4881e-04 1.4722e-04 7.0226e-05 5.2473e-04 5.1212e-04   0:00:26    95
```

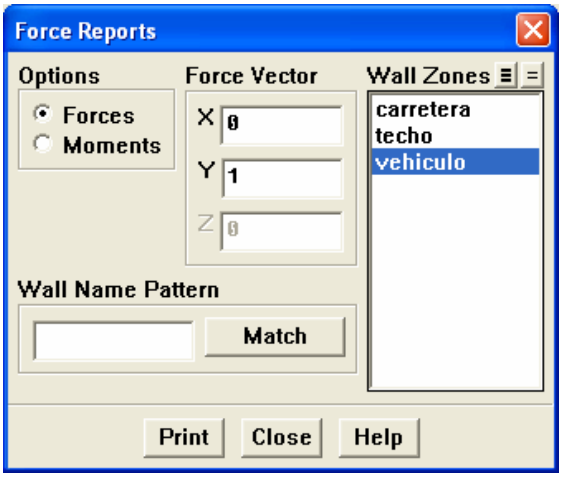
Y actualiza las gráficas anteriores de los residuales y los coeficientes.



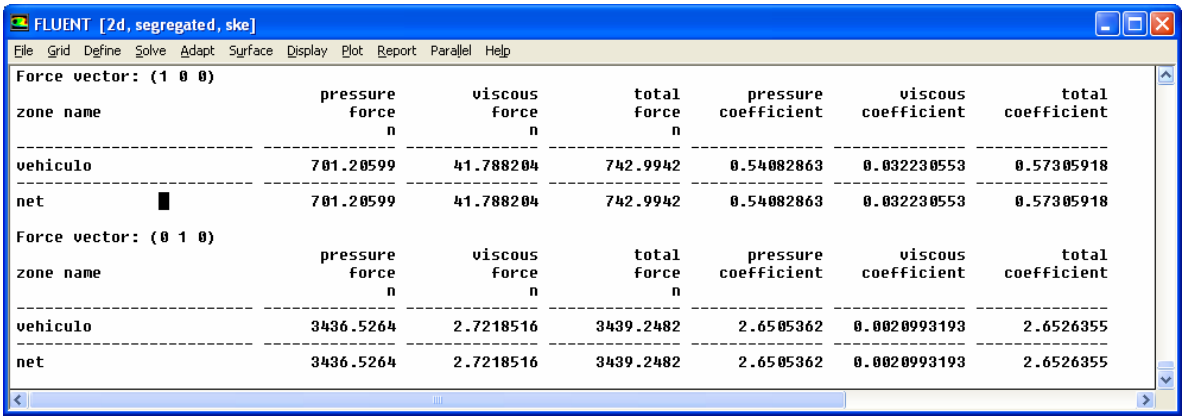
Residuales usando los métodos de primer orden.



Reports > Forces



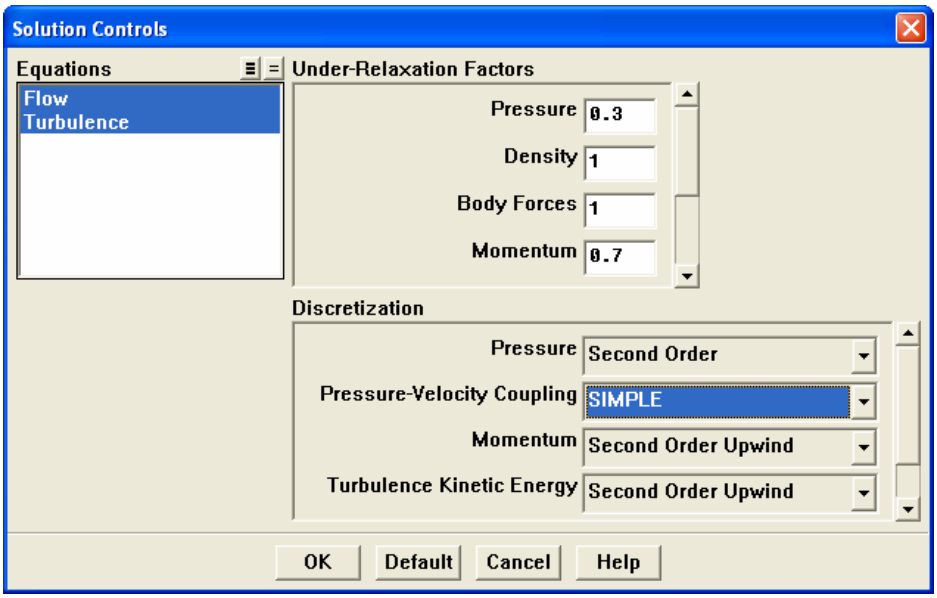
Monitoreo de fuerzas sobre el coche.


FLUENT [2d, segregated, ske]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
Force vector: (1 0 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 701.20599 | 41.788204 | 742.9942 | 0.54082863 | 0.032230553 | 0.57305918
net | 701.20599 | 41.788204 | 742.9942 | 0.54082863 | 0.032230553 | 0.57305918
Force vector: (0 1 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 3436.5264 | 2.7218516 | 3439.2482 | 2.6505362 | 0.0020993193 | 2.6526355
net | 3436.5264 | 2.7218516 | 3439.2482 | 2.6505362 | 0.0020993193 | 2.6526355

Vectores de fuerza (Con método de Primer Orden).

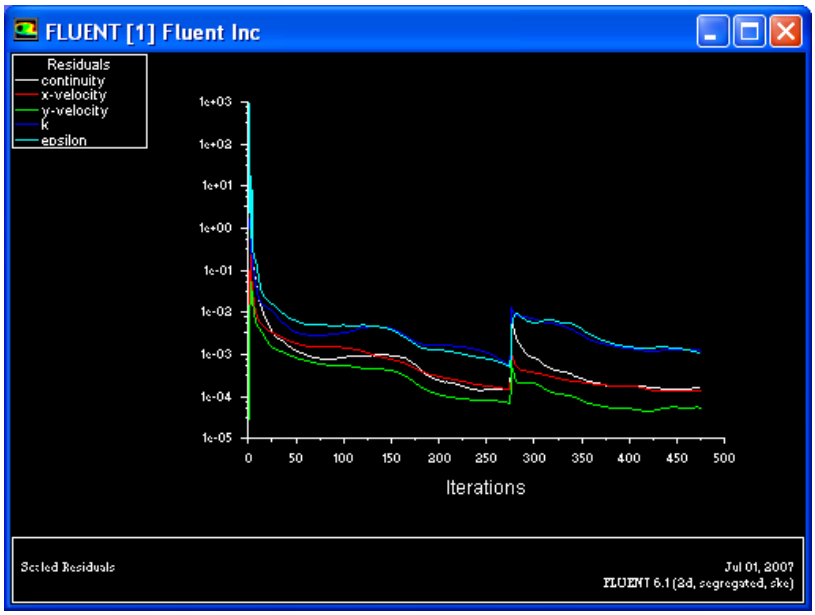
Para obtener una respuesta más refinda del modelo, partiendo de esta primera aproximación obtenida con métodso de primer orden, proseguiremos nuestra simulación utilizando métodos de segundo orden, para lo cual volvemos al menú de controles de los métodos de solución, esto es:

Solve Controls Solution

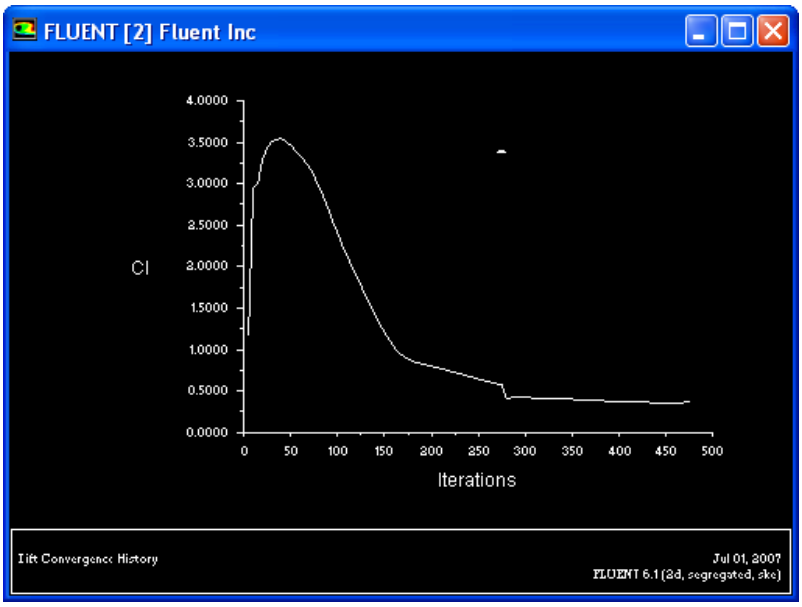


Nótense las diferencias con *Fluent versión 6.2*. Específicamente, la versión utilizada para elaborar esta simulación (6.1.18), no ofrece explícitamente la opción *Second Order* para el cálculo de acoplamiento Presión-Velocidad (*Pressure-Velocity coupling*), por lo que se sigue trabajando con el método SIMPLE para esta característica.

Continuamos haciendo 200 iteraciones y luego obtenemos las siguientes gráficas de residuales y reporte de vectores de fuerza.

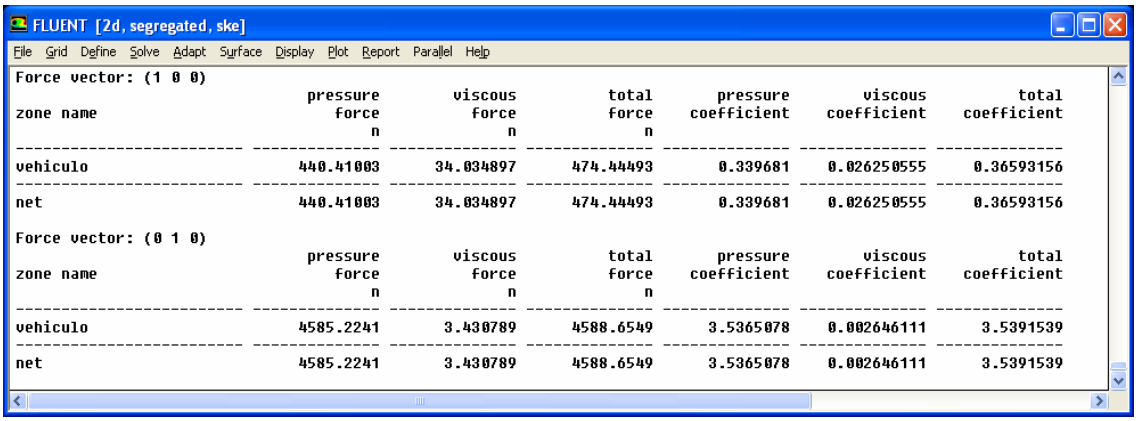


Residuales después las iteraciones con los métodos de segundo orden.



Coeficiente de sustentación usando los métodos de segundo orden.

A continuación, aparece un resumen de las variables y coeficientes del modelo.

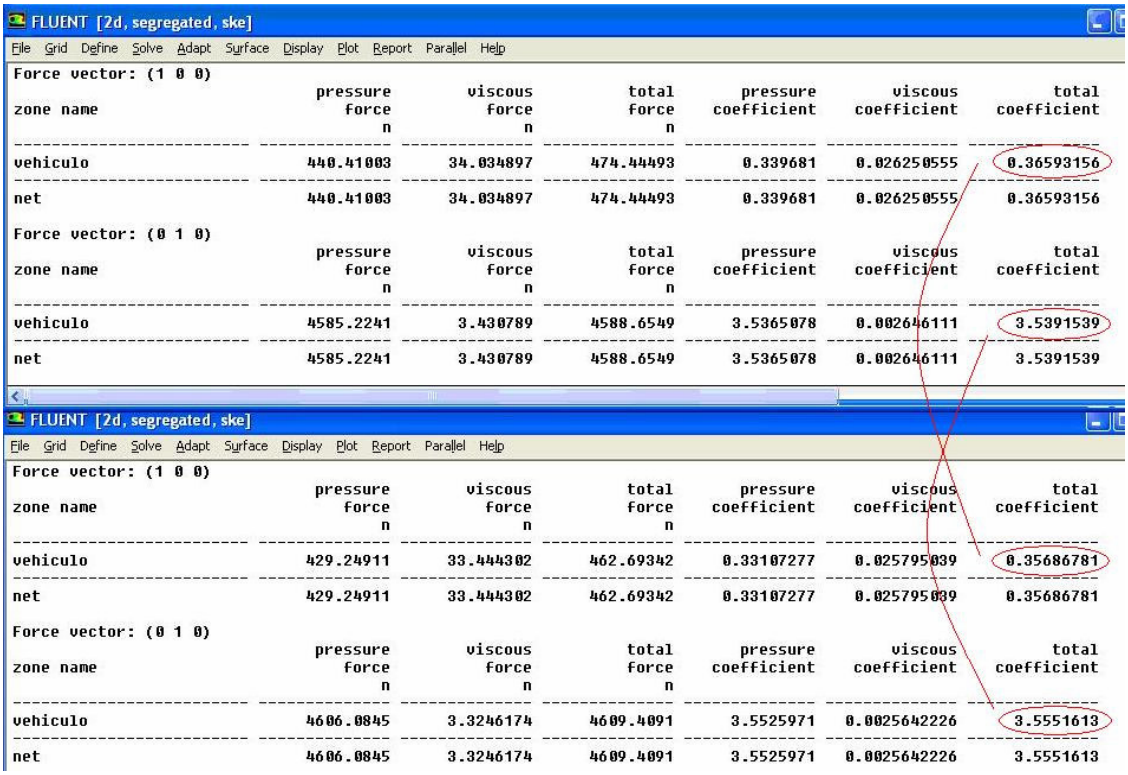

FLUENT [2d, segregated, ske]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
Force vector: (1 0 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 440.41003 | 34.034897 | 474.44493 | 0.339681 | 0.026250555 | 0.36593156
net | 440.41003 | 34.034897 | 474.44493 | 0.339681 | 0.026250555 | 0.36593156
Force vector: (0 1 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 4585.2241 | 3.430789 | 4588.6549 | 3.5365078 | 0.002646111 | 3.5391539
net | 4585.2241 | 3.430789 | 4588.6549 | 3.5365078 | 0.002646111 | 3.5391539

Vectores de fuerza (con Método de Segundo Orden)

Si se intentamos efectuar unas 100 iteraciones más (recordando que hemos efectuado 475 hasta ahora), *Fluent* se detiene e informa que el modelo ha convergido en 500 iteraciones, de la siguiente manera:

```
reversed flow in 27 faces on pressure-outlet 6.
! 500 solution is converged
  500 1.2274e-04 8.6555e-05 4.7701e-05 9.8463e-04 8.4030e-04  0:01:32  475
```

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los resultados obtenidos a 475 iteraciones y a 500, cuando Fluent se detuvo diciendo que la solución había convergido.

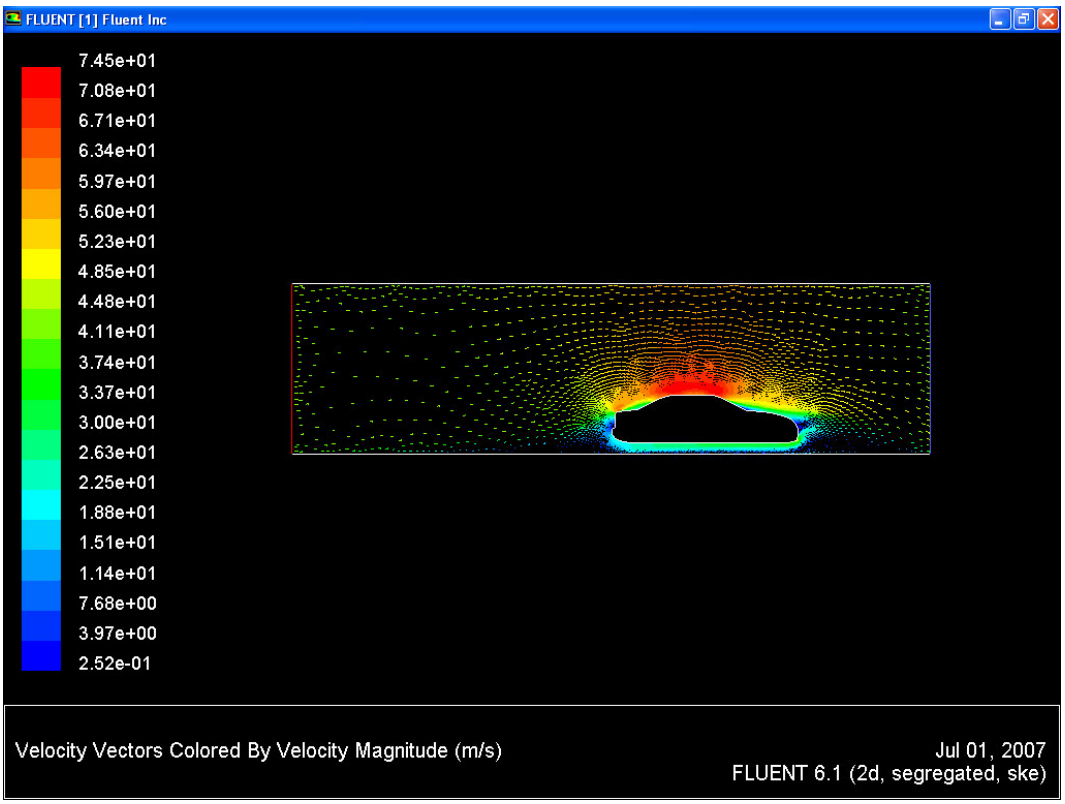

FLUENT [2d, segregated, ske]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
Force vector: (1 0 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 440.41003 | 34.034897 | 474.44493 | 0.339681 | 0.026250555 | 0.36593156
net | 440.41003 | 34.034897 | 474.44493 | 0.339681 | 0.026250555 | 0.36593156
Force vector: (0 1 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 4585.2241 | 3.430789 | 4588.6549 | 3.5365078 | 0.002646111 | 3.5391539
net | 4585.2241 | 3.430789 | 4588.6549 | 3.5365078 | 0.002646111 | 3.5391539
FLUENT [2d, segregated, ske]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
Force vector: (1 0 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 429.24911 | 33.444302 | 462.69342 | 0.33107277 | 0.025795039 | 0.35686781
net | 429.24911 | 33.444302 | 462.69342 | 0.33107277 | 0.025795039 | 0.35686781
Force vector: (0 1 0)
zone name | pressure force n | viscous force n | total force n | pressure coefficient | viscous coefficient | total coefficient
vehiculo | 4606.0845 | 3.3246174 | 4609.4091 | 3.5525971 | 0.0025642226 | 3.5551613
net | 4606.0845 | 3.3246174 | 4609.4091 | 3.5525971 | 0.0025642226 | 3.5551613

Comparación de resultados obtenidos con métodos de primer y segundo orden.

Nótese que los valores de los coeficientes se han mantenido muy cercanos, por lo que se evidencia la convergencia de ambos métodos.

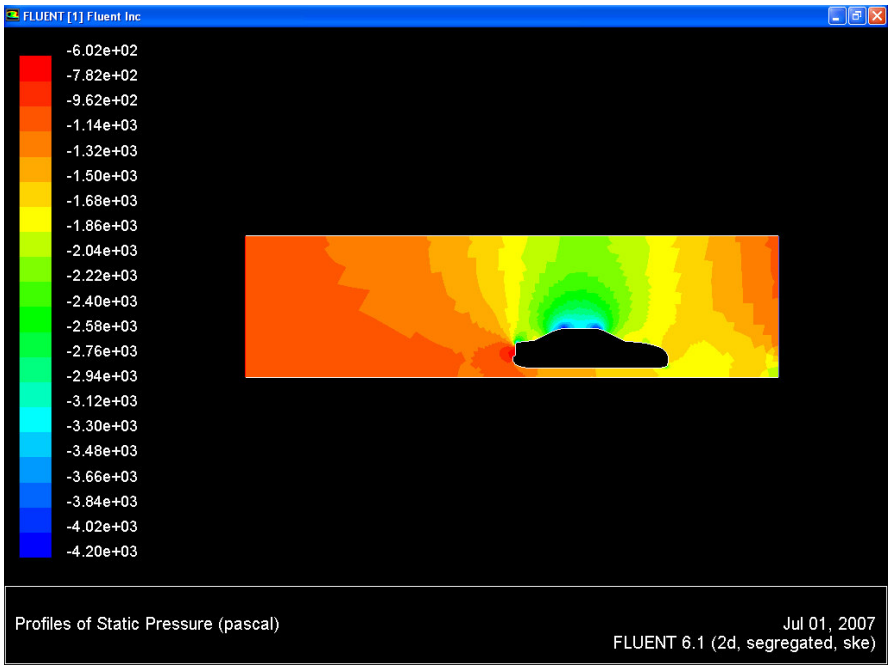
6. Comentarios y Recomendaciones respecto de los resultados obtenidos.

Para efectos de análisis, seguidamente mostramos los vectores que representan los cambios de la velocidad del flujo alrededor del vehículo. Nótese que la velocidad del viento varía desde los 25 m/s, unos 90 Km/h, justo detrás del vehículo, hasta los 75 m/s, unos 270 Km/h, justo sobre el techo del vehículo, lo cual contribuye a que éste tienda a mantenerse pegado a la carretera. La baja velocidad debajo del vehículo respecto de la velocidad sobre el techo, evita que el vehículo tratara de ser levantado por efecto del viento. Esto es exactamente lo contrario a lo que ocurre con los aviones, en donde la relación de velocidades debe ser inversa para poder generar suficiente fuerza de sustentación que logre elevarlos del suelo.



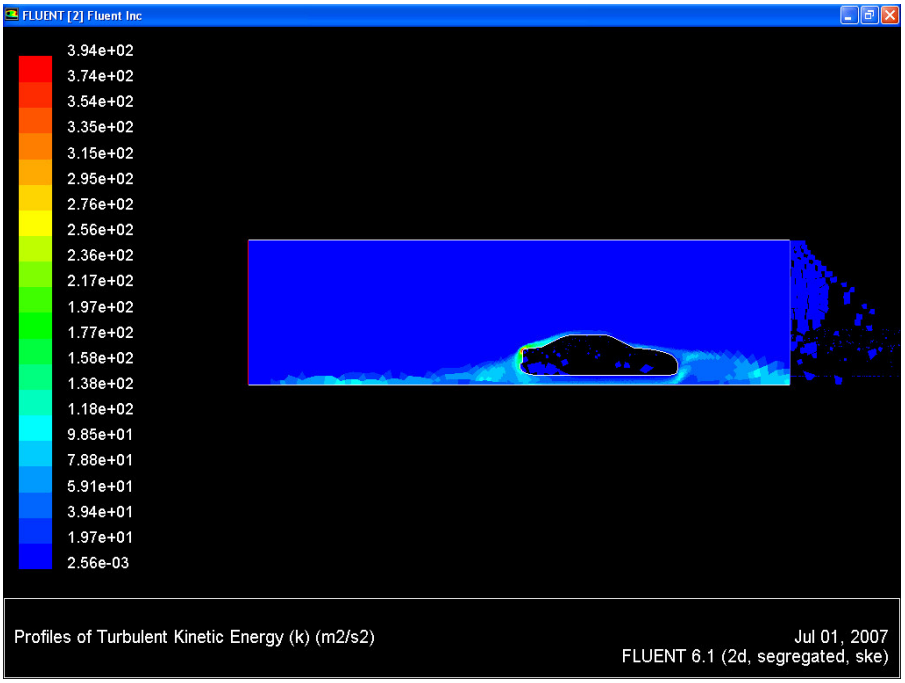
La presión ejercida por el flujo de aire sobre el vehículo, mostrada en la siguiente gráfica, presenta sus más altos valores justo sobre el techo, complementando el comentario anterior sobre la conveniencia de esto para el agarre del vehículo a la carretera, con lo cual se mejora su estabilidad. En comparación con el modelo simplificado utilizado en los tutoriales, este vehículo presenta un perfil más aerodinámico, que favorece su estabilidad. Por otra parte, el consumo de combustible se

ve disminuido debido a la menor oposición frontal al viento que ofrece el perfil de este vehículo.



Perfil de Presión del modelo,

En la siguiente gráfica, se observa el comportamiento de la turbulencia ocasionada por el vehículo sobre el flujo de aire que lo rodea. Se puede apreciar que la mayor turbulencia se ocasiona sobre la cola del vehículo, pero, en general, es bastante baja alrededor de todo el contorno del mismo.



Perfil de Energía Cinética de la Turbulencia.

Por último, respecto de la simulación en general, se puede concluir que el modelo estuvo bien formulados y debidamente parametrizado, por lo que los resultados obtenidos son bastante cercanos a la realidad. Desde el punto de vista computacional, el esfuerzo de cálculo fue relativamente bajo> en apenas 500 iteraciones se tenían resultados por debajo de los criterios de convergencia establecidos, lo cual da cuenta de que el mallado fue muy bueno, de hecho, no requirió aplicar ningún suavizado (*Smooth/Swap*) extra por parte de *Fluent*.

Sería recomendable la realización de simulaciones en 3D, para ampliar las observaciones sobre el comportamiento del vehículo dentro de este flujo de aire.

Referencias Bibliográficas.

1. **http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number**, consultado el 24/06/2007.
2. *Rodger W. Dyson, Scott D. Wilson, Roy C. Tew, Rikako Demko.* Stirling Analysis Comparison of Comercial Versus High-Order Methods. Publicado por la National Aeronautics and Space Administration, documento: NASA/TM—2005-213976, USA. 2005. Disponible en: http://gltrs.grc.nasa.gov visitado 30Jun2007.
3. *Ortega. J.* Tutoriales del *Gambit* y *Fluent*. Publicados en el *moodle* de la Universidad de Málaga, 2007.
4. *Fluent, Inc.* Ayuda en línea y documentación de Fluent 6.1.18.
5. *Fluent, Inc.* Turbulent Flow and Heat Transfer in a Mixing Elbow, Agosto, 1998. pp. 60. USA.
6. K.M. Kwong and P.W. Chan. *LIDAR-based Turbulence Intensity Calculation along Glide Paths.* Hong Kong Polytechnic University, 14th Coherent Laser Radar Conference Snowmass, Colorado, USA, 8 - 13 July